

不規則波底面境界層の乱流遷移に対する履歴効果

鈴木 健*・ムスタファ アタウス サマド**・山路 弘人***・田中 仁****

1. はじめに

波動下での底面近傍における流速場や底面せん断力を正確に見積もることは漂砂量の算定にあたり非常に重要である。この際、底面境界層の特性は flow regime に応じて大きく異なるため、これまでに乱流遷移に関する研究が数多くなされてきた。

これまでに、Hino *et al.* (1976) や Jensen *et al.* (1989) などにより乱流遷移レイノルズ数が示されている。これらの研究のほとんどは正弦振動流を対象としたものである。しかし、実際の波は不規則であるということ、その境界層特性が底質移動現象を支配していることを考慮すると、不規則波動下における遷移特性を明らかにすることが重要である。このような背景から不規則波を対象とした実験的・理論的研究も行われているが、正弦波のものに比べて極めて少ない。このうち実験的検討としては、サマドラ (1999) の研究があり、正弦波動境界層とは異なる興味深い現象が観察されている。

そこで本研究では、不規則振動流下において、以前の研究ではなされていない高レイノルズ数を含む範囲での底面境界層について風洞実験を行う。流れの遷移挙動について実験データから詳細に検討し、波の不規則性が乱流遷移に与える影響を明らかにする。

2. 実験方法

実験装置は不規則振動流発生装置と風洞部からなり、その概要を図-1 に示す。駆動部にはサーボモータを使用しており、任意の不規則信号を入力することができる。サマドラ (1999) にない、表面波形として Bretschneider・光易型スペクトルを用いた。12 波程度の不規則波からなる信号を繰り返し入力することにより、流速の位相平均値を求める。風洞の内部は滑面である。50 波の位相平均値から乱れ強度、平均流速を求めた。層流と乱流の両方が含まれるようにレイノルズ数を設定して実験

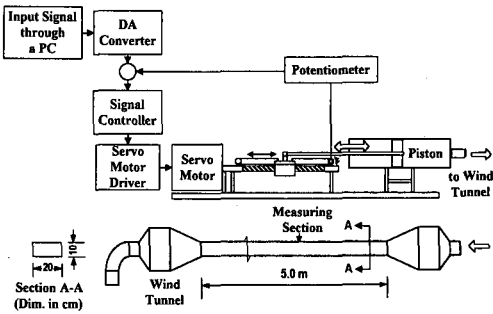


図-1 実験装置

表-1 実験条件

Exp.	$T_{1/3}$ (s)	$U_{1/3}$ (cm/s)	$Re_{1/3}$
Case 1	3.0	161	8.42×10^4
Case 2	3.0	273	2.42×10^5
Case 3	3.0	392	5.02×10^5
Case 4	3.0	464	7.02×10^5
Case 5	3.0	526	9.03×10^5
Case 6	3.0	502	8.20×10^5

を行った。ここで用いるレイノルズ数は、

$$Re_{1/3} = \frac{U_{1/3}^2}{\nu \omega_{1/3}}, \quad \omega_{1/3} = \frac{2\pi}{T_{1/3}} \dots\dots\dots (1)$$

である。ここで $T_{1/3}$ は有義波周期、 $U_{1/3}$ は有義波の諸元にに基づく代表流速、 ν は動粘性係数である。実験は全て同じ入力信号を用い、入力信号に係数を乗ずることで各ケースの $Re_{1/3}$ を得ることができる。実験条件は表-1 に示す。Case 1~5 では風洞中央部の底面から高さ 10 mm、50 mm の 2 点において、また、Case 6 では底面から鉛直方向に 20 カ所において流速測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 乱れ強度とレイノルズ数の比較

図-2 に Case 1~5 での流速生データを示した。図中左の矢印において、レイノルズ数の大きいケースほど大きく乱れが生じている。しかし、右の矢印においては 5 ケース全てで乱れがほとんど見られない。

* 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 東北大学大学院教務職員 工学研究科土木工学専攻
**** 正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

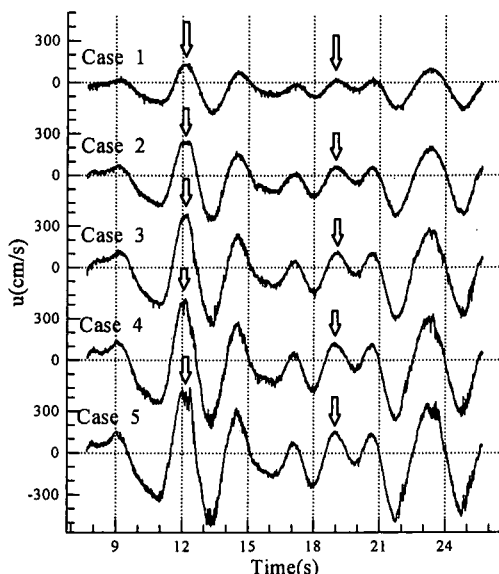


図-2 流速波形データ (z=10 mm)

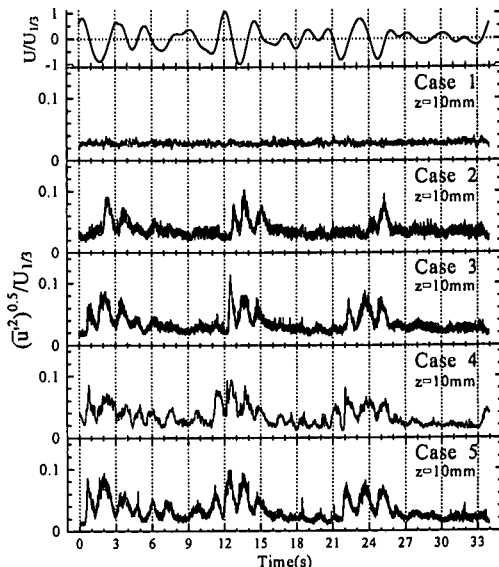


図-4 乱れ強度 (z=10 mm)

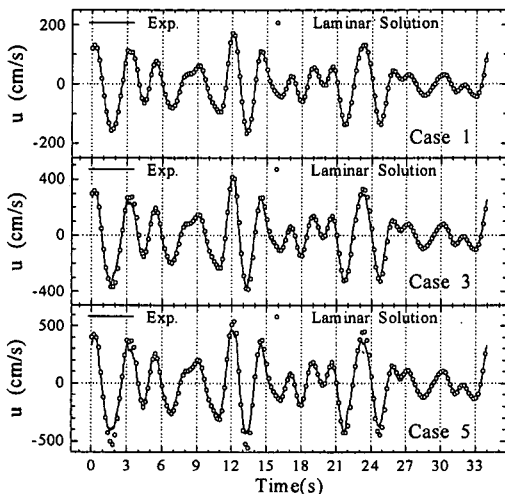


図-3 流速波形と層流解 (z=10 mm)

層流解と位相平均流速を図-3に示した。Case 1では層流解との極めて良好な一致が見られる。レイノルズ数の増加につれ、大きな層流解とのずれが見られるが、いずれのケースにおいても流速の小さな部分では良好な一致を示す。このことから一連の不規則波の中に層流と乱流状態が混在していることが確認できる。

乱れ強度について図-4に示す。Case 2～Case 5には、比較的大きな峰・谷の部分において値が大きくなるという一定の傾向が見られ、ここで乱流が生じていると考えられる。Case 1は他のケースと同じような傾向は見られず、一定して低い値を保つため層流であるといえる。乱

れ強度が零にならないのは実験時に生じたノイズのためと考えられる。これらのことから、底面から10 mmの位置では、Case 1とCase 2の間に乱流遷移限界があることが分かる。

境界層外縁流速波形の峰位相と谷位相を正弦振動の半分とみなし、波の峰位相、谷位相それぞれに対し、以下の式で示されるレイノルズ数 Re_p を算出した。

$$Re_p = \frac{U_p^2}{\nu \omega_p} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\omega_p = \pi/T_p$ 、 U_p ：峰位相または谷位相の流速最大値、 T_p ：峰位相または谷位相の継続時間である。これを導入することで、不規則波を構成している波ひとつひとつにレイノルズ数を与えることができ、乱流遷移限界レイノルズ数を検討することができる。また、波の峰位相、谷位相それぞれに対し、以下の式(3)のようにして乱れ強度の平均値をそれぞれ求め、 Re_p とともに図-5に示した。

$$\sqrt{u^2}_{avg} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \sqrt{u^2} dt \dots \dots \dots (3)$$

Re_p の増加とともに乱れも増加するが、必ずしも Re_p の大きなものほど乱れも大きいわけではない。また、時間的にも、 Re_p の変動と比べると乱れの発現は遅れている。Sana and Tanaka (1996)によると正弦波動下での乱流遷移限界レイノルズ数は $Re = 1.38 \times 10^5$ であり、本実験の結果と合わせてみるとCase 1とCase 2の間の値になっている。しかし、不規則波動下では、この値より大きな Re_p であっても、図-5のCに見られるように乱れを生じないものがある。また、これより小さな値でも、

図-5のC'のように乱れを生じるものも存在している。乱れを生じるものは直前の Re_p が大きく、乱れを生じないものは直前の Re_p が小さい。つまり、その時点での Re_p の大小だけでなく、それ以前の波の影響を受けて乱流へ遷移するものと考えられる。

3.2 無次元化乱れ強度

乱れ強度をそれぞれの位相の最大流速 U_p で除して無次元化し、それらのレイノルズ数による変化を図-6に示した。

正弦波動下での乱流遷移限界値よりも大きい範囲では、無次元化された乱れは0.06程度の値をとる傾向が見られる。その中で比較的小さい値をとるものに着目した。図中A~Fで示したものは、いずれも直前の位相において大きな乱れを生じていないことが分かる(図-5)。また、正弦波の遷移限界より小さな部分では、直前の乱れの影響から大きな値を示していると考えられる。よって無次元化したときの乱れは直前の位相の影響を受けていると言える。

3.3 高レイノルズ数における乱流構造

振動流において、底面の影響は底面からの距離に比例

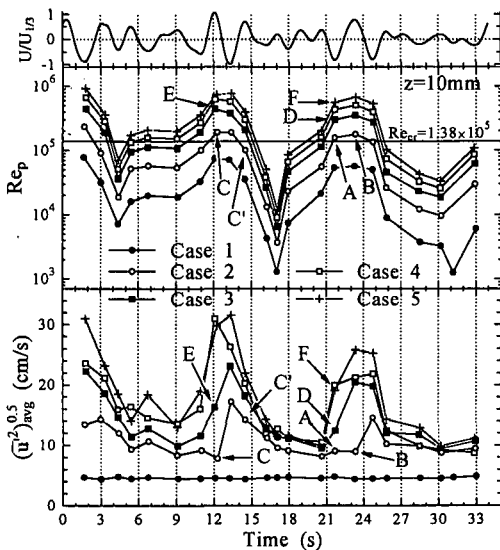


図-5 レイノルズ数・乱れ強度平均値 ($z=10$ mm)

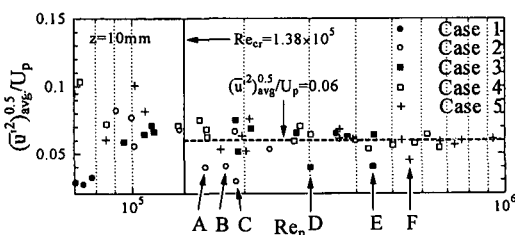


図-6 無次元化乱れ強度平均値 ($z=10$ mm)

した位相だけ遅れて遠方に伝達されるため、層流ではその流速分布に overshoot が見られる。しかし、乱流では流速は一様化しようとして運動量輸送が行われ、その分布は対数則に従う。

図-7には、各測定点における位相平均流速と層流解を示した。底面に近いほど実験値が層流解に比べて大きい値をとる。 $z=3.00$ mm付近で層流解と一致しかけるものの、それより高い位置では、逆に層流解が実験値よりも大きな値を示すようになる。これは、層流解では overshoot が発生するが、実験では発生していないためであり、実験での流速が対数則分布に従っていることを示す、つまり乱流が生じている証拠といえる。層流解との差は $z=6.00$ mmで最大となり、測定位置が高くなるに連れて減少し、 $z=25.02$ mm以降ではほぼ層流解と一致する。実験値が層流解に比べ少し位相に遅れがあるように見えるのは、乱れが減速位相で生じているためである。流速の小さな層流域で位相のずれがないことから全体的に位相がずれているわけではないことが確認できる。

Case 6において Re_p のほぼ等しい二つの谷位相を比較した。G: $Re_p=6.8 \times 10^4$ と H: $Re_p=7.8 \times 10^4$ の二つに着目し、流速の鉛直分布を図-8に示した。Hに乱れは見られず、層流解との良好な一致を示すのに対し、GはHよりレイノルズ数が小さく、正弦波の遷移限界値よりも小さいにも関わらず乱れを生じている。ここでも、その直前の峰位相において、Gでは Re_p が大きく、大きな乱れが存在するのに対し、Hでは Re_p が小さく乱れが見られない。乱流への遷移はその時点での Re_p の大小だけでは判断できず、それ以前の波の影響を受けて遷移するものと考えられる。

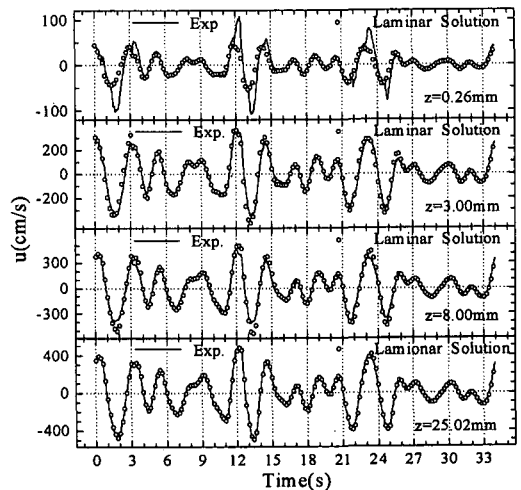


図-7 流速波形と層流解 (Case 6)

図-9に示される乱れ強度の鉛直分布を見ると、乱れは底面近傍で発生し始め、時間の経過とともにその位置が上昇していくことから、乱れが拡散していく様子がうかがえる。乱れ強度の最大値は風洞底面から少し離れたところに見られるが、この風洞底面から乱れ強度の現れるところまでの距離が粘性底層厚だと考えられる。ここで示したのは図-8のG', G, H', Hに該当する部分あり、Gでは直前の乱れの影響が残っていることがわかり、そのため乱流が容易に発生していると考えられる。

3.4 不規則波動下の底面せん断力

本研究では直接せん断力を測定することができないため、流速データからせん断力を求めなければならない。本研究では粘性底層での流速勾配と対数分布則の両方を

用いてせん断力を求めた。粘性底層内と乱流域の流速分布は以下の式(4)、(5)のように示される。

$$\frac{u(z)}{U_\tau} = \frac{U_\tau z}{\nu} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{u(z)}{U_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_\tau z}{\nu} + A_s \dots\dots\dots (5)$$

本研究では図-10に示したように、乱流域では対数分布式と粘性底層での式を同時に実験値に重ね合わせることで摩擦速度 U_τ 、定数 A_s 、カルマン定数 κ を得た。また、層流域においては粘性底層での式のみを用いた。

Hino *et al.* (1983) によると、正弦振動流において減速期の強い乱れが発生している位相では定常流と同様に $A_s=5.5$ 、 $\kappa=0.4$ である。これらと共に不規則波動下での A_s 、 κ の変化を図-11に示した。加速位相では値が大きくなるが、減速位相では平行流での値との良好な一致を示す。

実験値の摩擦速度から求めたせん断力と層流解の時系

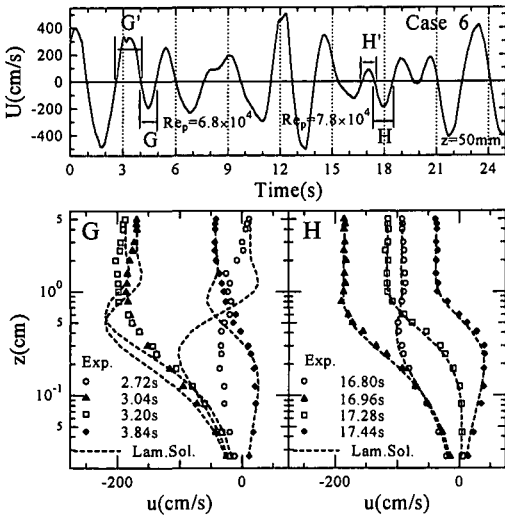


図-8 流速鉛直分布と層流解

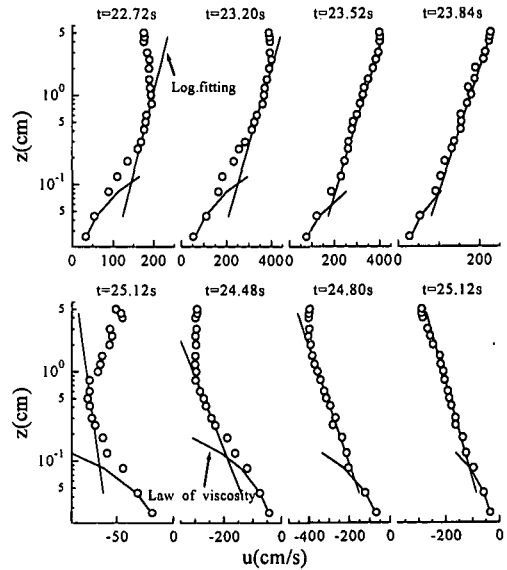


図-10 実験値の対数則、線形分布との重ね合わせ

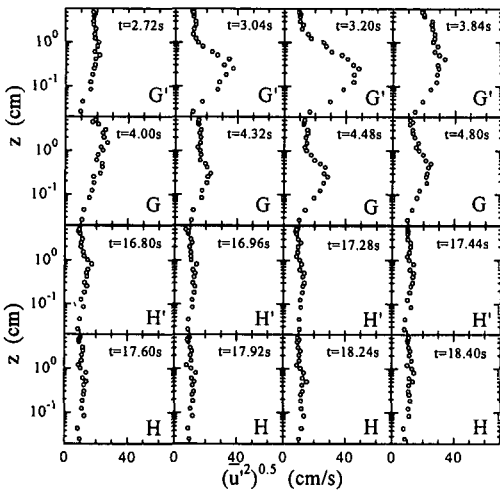


図-9 乱れ強度の鉛直分布

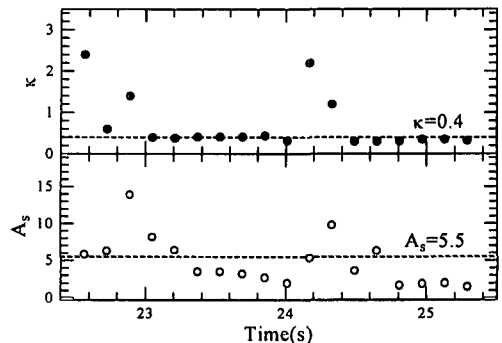


図-11 A_s と κ の変化 ($t=22.4\text{ s} \sim 10.7\text{ s}$)

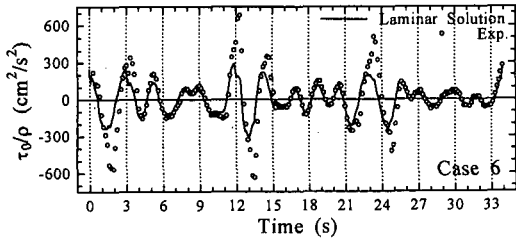


図-12 底面せん断力と層流解

列を図-12に示した。乱れの強い位相では層流解からのずれが大きい。乱れの運動量輸送により、底面近傍の流速が大きくなるためにせん断力は層流解よりも大きな値を示している。

4. おわりに

本研究では、正弦波乱流遷移レイノルズ数を超える波を含む不規則波に対して波の履歴効果を確認することができた。そのため不規則波動下では正弦波動下のように単一のレイノルズ数値で乱流遷移限界値を定めることはできない。

不規則波動下の底面境界層を対象とした実験的検証はこれまでにほとんどなされたことがなく、精密な砂移動

モデルを構築するためには、より実際の状況に近い形でのデータが必要となる。今後は風洞内において滑面ではなく粗度をもつ底面での実験を行う予定である。

謝辞：本研究を実施するに際して、スカンジナビア・ニッポン ササカワ財団の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- ムスタファ アタウス サマド・田中 仁・山路弘人 (1999): 不規則波底面境界層の実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 21-25.
- Hino, M., M. Sawamoto and S. Takasu (1976): Experiments on transition to turbulence in an oscillatory pipe flow. J. Fluid Mech., Vol. 75, pp. 193-207.
- Hino, M., M. Kashiwayanagi, A. Nakayama and T. Hara (1983): Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow, J. Fluid Mech., Vol. 131, pp. 363-400.
- Jensen, B. L., B. M. Sumer and J. Fredsoe (1989): Turbulent oscillatory boundary layer at high Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol. 206, pp. 265-297.
- Sana, A and H. Tanaka (1996): The testing of low Reynolds number $k-\epsilon$ models by DNS data for oscillatory boundary layer, Flow Modeling and Turbulence Measurement IV, pp. 363-370.